



Enrique LARREA BELLOD es licenciado en Ciencias Físicas con Premio Extraordinario por la Universidad Autónoma de Madrid (1974). Doctor en Ciencias Físicas con Premio Extraordinario por la Universidad de Santiago de Compostela (1981) y Diplomado en Ingeniería Nuclear por el Instituto de Estudios Nucleares (1977). Ha seguido varios cursos de especialización en el extranjero (ICI, ITP), habiendo participado en varios congresos y realizado más de 40 publicaciones internacionales en el campo técnico. En 1977 se incorporó al equipo de proyecto de C.N. Regodola. En 1982 pasó a formar parte del Grupo de Proyecto de C.N. Trillo en el Departamento de Ingeniería y en el 1988 al Grupo de Soporte Operativo de Apoyo Técnico a la Central de Trillo I. En julio de 1990 se incorporó a la Dirección de Comunicaciones y Automatización de Unión Fenosa.



Cesar DE LA CAL LOSADA es licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid (1977). En 1982 se incorporó al proyecto de la Central de Trillo, donde desde 1987 ocupa el puesto de Jefe de Ingeniería de Producción.

VIGILANCIA DE VIBRACIONES EN EL PRIMARIO DE C.N. TRILLO I

E. LARREA - C. DE LA CAL

Para cumplir con las exigencias de las guías RSK y KTA 3204, C.N. TRILLO I ha incorporado un sistema de vigilancia de vibraciones (VMS) para la detección anticipada de fallos, los cuales pueden ser detectados por cambios del comportamiento vibratorio de los componentes del sistema primario. Para la vigilancia del comportamiento dinámico de los internos de la vasija y de los componentes del primario, se emplean principalmente cuatro tipos de medidas: desplazamientos absolutos de la vasija, flujo neutrónico, desplazamiento relativo de las tuberías del primario y de las bombas respecto al edificio y fluctuaciones de presión en el refrigerante primario. Asimismo, durante la puesta en marcha se realizaron medidas especiales para determinar los desplazamientos relativos entre la vasija y el barrilete. Todas las señales pueden ser analizadas tanto en tiempo como en el dominio de frecuencias. En este artículo se resume el programa de medida de vibraciones que se realizó durante la puesta en marcha de C.N. Trillo mediante el sistema VMS (YG20) y su seguimiento

durante la operación comercial.

PROGRAMA DE PRUEBAS DE MEDIDA DE VIBRACIONES

El programa de pruebas de vibraciones en la vasija del reactor, en los elementos internos en el núcleo y en el sistema primario se desarrollaron durante las fases B (Prueba Funcional en Caliente sin núcleo), C (Prueba Funcional con Núcleo cargado) y D (Pruebas a Potencia).

Los objetivos de las pruebas que se realizaron en estas distintas fases fueron:

- FASE B: Comprobación del análisis de Fatiga, mediante la medida de vibraciones en los Internos de la Vasija.
- FASE C: Vigilancia de las vibraciones y medida de la influencia de la Temperatura sobre las frecuencias propias de las partes supervisadas.
- FASE D: Vigilancia de las vibraciones y medida de la influencia de la Potencia del Reactor sobre la fre-

cuencia propia de las partes supervisadas y obtención de los valores de referencia para la supervisión durante la operación comercial.

Adicionalmente y de acuerdo con la KTA3204 y el programa de inspección en servicio, se realiza al menos tres veces el programa de medida de vibraciones durante el ciclo.

COMPROBACION DEL ANALISIS DE FATIGA

La justificación de resistencia mecánica se llevó a cabo mediante cálculo de análisis de fatiga de los Internos de la vasija para las condiciones previstas de Operación.

Las vibraciones inducidas sobre los internos producidas por el caudal de refrigerante, al no poderse calcular esta componente, tuvo que ser medida. Todos los análisis estructurales (cálculos y

medidas) realizados en plantas KWU han demostrado que la respuesta estructural (desplazamientos) de los internos de la vasija es mayor en estado frío que en estado caliente, y sin elementos combustibles mayor que con ellos. De ello se deduce que los mayores desplazamientos aparecen en estado frío sin elementos combustibles.

Asimismo, todos los análisis estructurales realizados para reactores KWU han demostrado que la brida de los internos superiores es el componente más relevante desde el punto de vista del comportamiento vibratorio de los internos de la vasija.

Por ello se midieron exclusivamente los movimientos del barrilete como valores de referencia.

La comparación de los valores medidos de desplazamientos del barrilete y los valores máximos calculados constituyen una justificación de las resistencia a las tensiones operacionales, los cuales de-

ben mantener su integridad hasta 10^7 ciclos de carga.

VIGILANCIA DE VIBRACIONES

Cualquier daño existente o en desarrollo en la estructura mecánica se puede detectar rápidamente como un cambio en el comportamiento vibratorio.

El comportamiento dinámico de una estructura se caracteriza completamente por su frecuencia propia, la correspondiente amplitud, su amortiguamiento y su forma característica. De todas ellas, la frecuencia es la variable más adecuada para realizar dicha supervisión.

Para evitar interpretaciones erróneas durante la realización de las pruebas periódicas, se deben diferenciar los cambios en las frecuencias vigiladas como consecuencia de daños, de aquellos cambios en las frecuencias producidos por variaciones en otros parámetros.

Por ejemplo, se producen cambios en las frecuencias de resonancia como consecuencia de la variación de los parámetros asociados a variaciones en el estado de la Central:

- Módulos de Young E de los materiales de las estructuras.
- Soportado.
- La velocidad de propagación del sonido en el agua.

La magnitud fundamental en este proceso es la temperatura; por ello se midió en la fase C su influencia sobre las frecuencias de resonancia.

La influencia de la potencia del reactor se manifiesta igualmente sobre las frecuencias propias como consecuencia de las variaciones de temperatura asociadas a sus cambios, determinándose esta influencia durante las pruebas nucleares en la fase D de potencia.

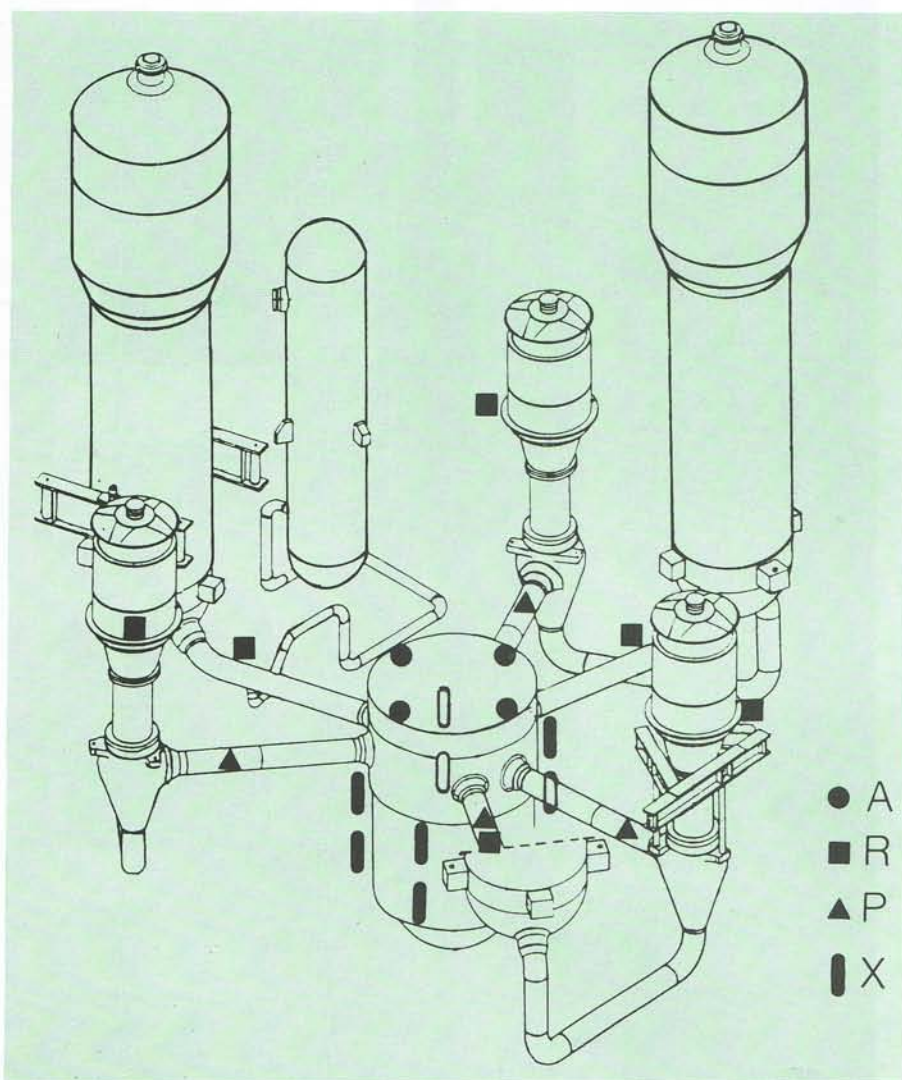
OBJETIVOS DE LAS DIFERENTES SEÑALES DE MEDICION

La C.N. de Trillo I se ha equipado con un sistema de vigilancia de vibraciones cuya misión es vigilar los componentes más importantes del sistema primario respecto a su comportamiento dinámico. En la figura I se representa el sistema de vibraciones del primario instalado de forma permanente en C.N. Trillo, y que fue fabricado por KWU.

DESPLAZAMIENTO RELATIVO VASIJA-BARRILETE (Tipo R)

Como comprobación de la resistencia mecánica de los internos durante la fase B, se midieron los desplazamientos máximos de Vasija-Barrilete, así como la función de transferencia de desplazamientos barrilete-vasija respecto a des-

FI Puntos de medida de vibraciones en el circuito primario



plazamientos absolutos de Vasija, para así poder comprobar durante la operación comercial los desplazamientos de los internos más importantes mediante medidas periódicas desde fuera de la vasija.

ALARGAMIENTOS EN LA TOBERA DE BARRAS DE CONTROL

El proceso explicado en el punto anterior es válido para este caso y se midió también durante la fase B.

DESPLAZAMIENTOS ABSOLUTOS DE LA VASIJA (Tipo A)

Las medidas obtenidas sirven para comprobar si los movimientos de la vasija están dentro del rango normal esperado para reactores PWR tipo KWU.

Junto con las señales de desplazamiento relativo Vasija-Barrilete indican la posibilidad de medir los desplazamientos de los principales componentes de la vasija desde fuera de la misma, empleando una función de transferencia que se midió durante la fase B.

DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS DE LOS LAZOS Y LAS BOMBAS RESPECTO AL EDIFICIO (Tipo R)

Estas medidas sirven para determinar el movimiento de los lazos y las Bombas principales, y para comprobar si los movimientos de los lazos tienen alguna influencia sobre los desplazamientos absolutos de la Vasija.

FLUCTUACIONES DE PRESION EN LOS LAZOS (Tipo P)

Estas medidas sirven para comprobar si las fluctuaciones de Presión en los lazos tienen alguna influencia sobre los desplazamientos absolutos de la Vasija, y poder discriminar las vibraciones mecánicas de aquéllas debidas a resonancias del fluido.

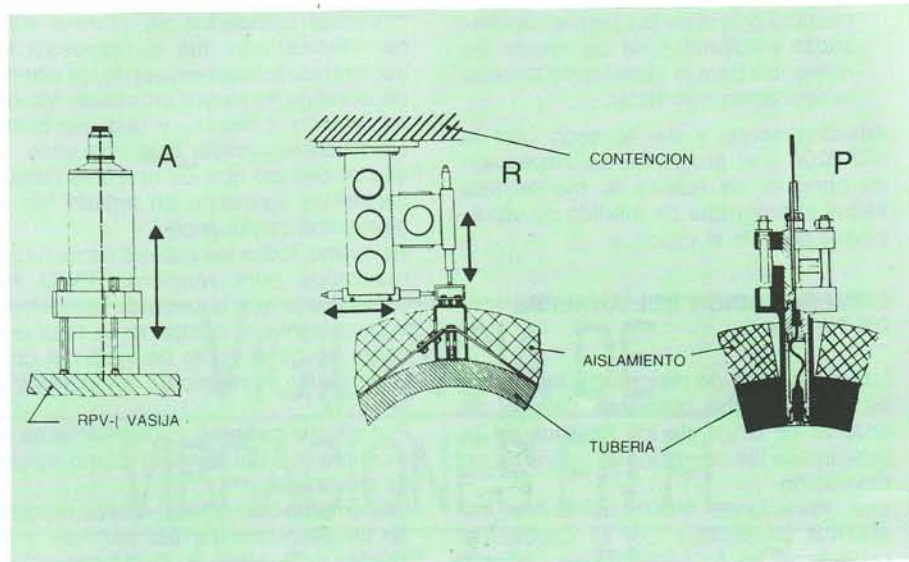
MEDIDA DE FLUJO DE NEUTRONES (Tipo X)

Las cámaras de flujo neutrónico de potencia dan una información alternativa del comportamiento vibratorio de los internos de la vasija y, en especial, del movimiento pendular del barrilete y de los modos de vibración de los elementos combustibles.

En la figura 11 se muestran algunos detalles del montaje de los transductores de tipo A, R y P.

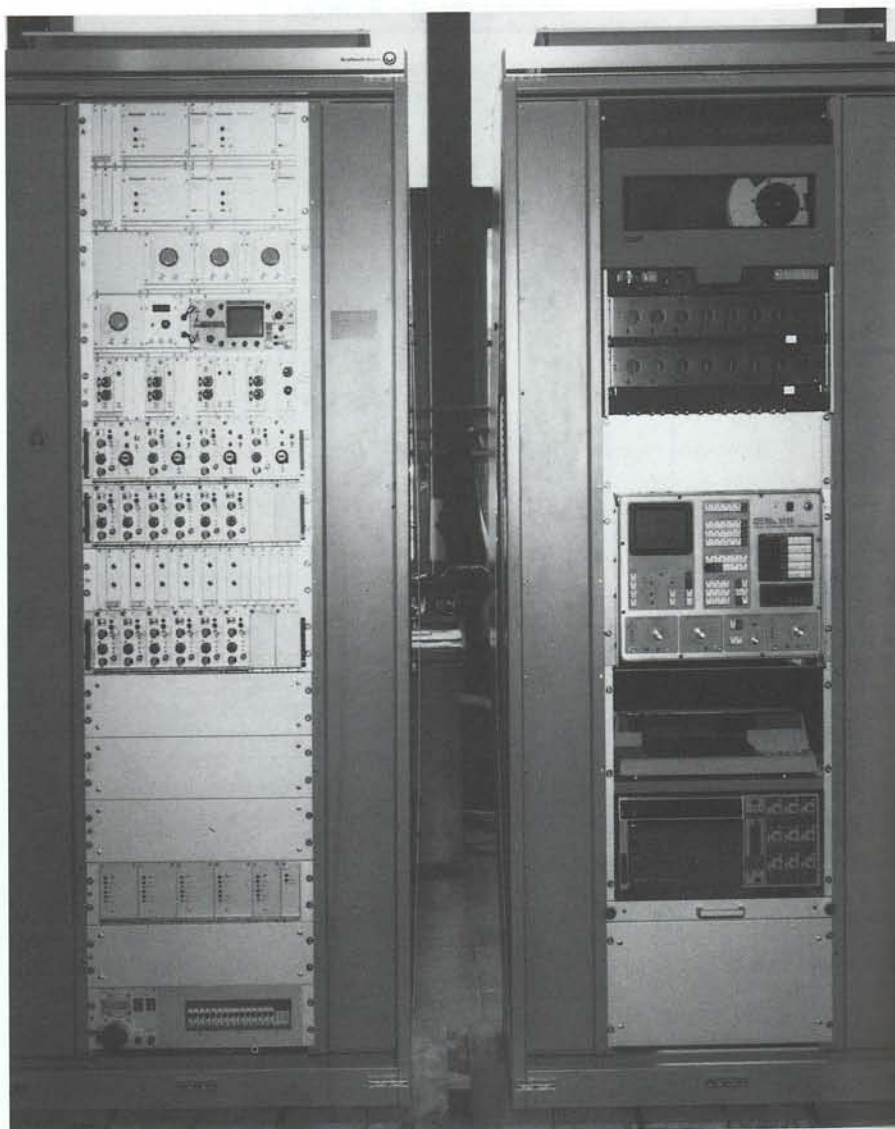
EVALUACION DE RESULTADOS

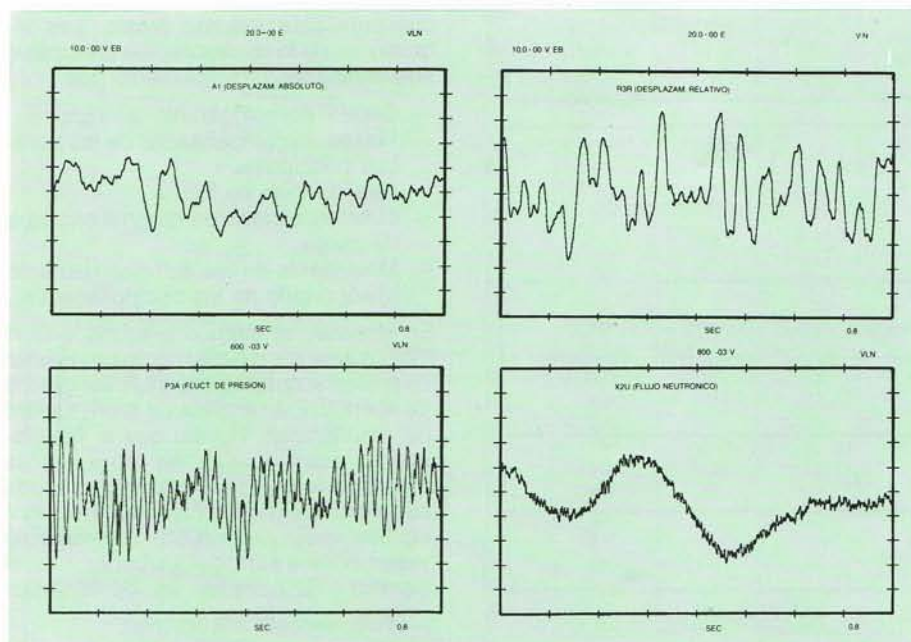
Para cada prueba se realiza una evalua-



F II Montaje típico de los transductores

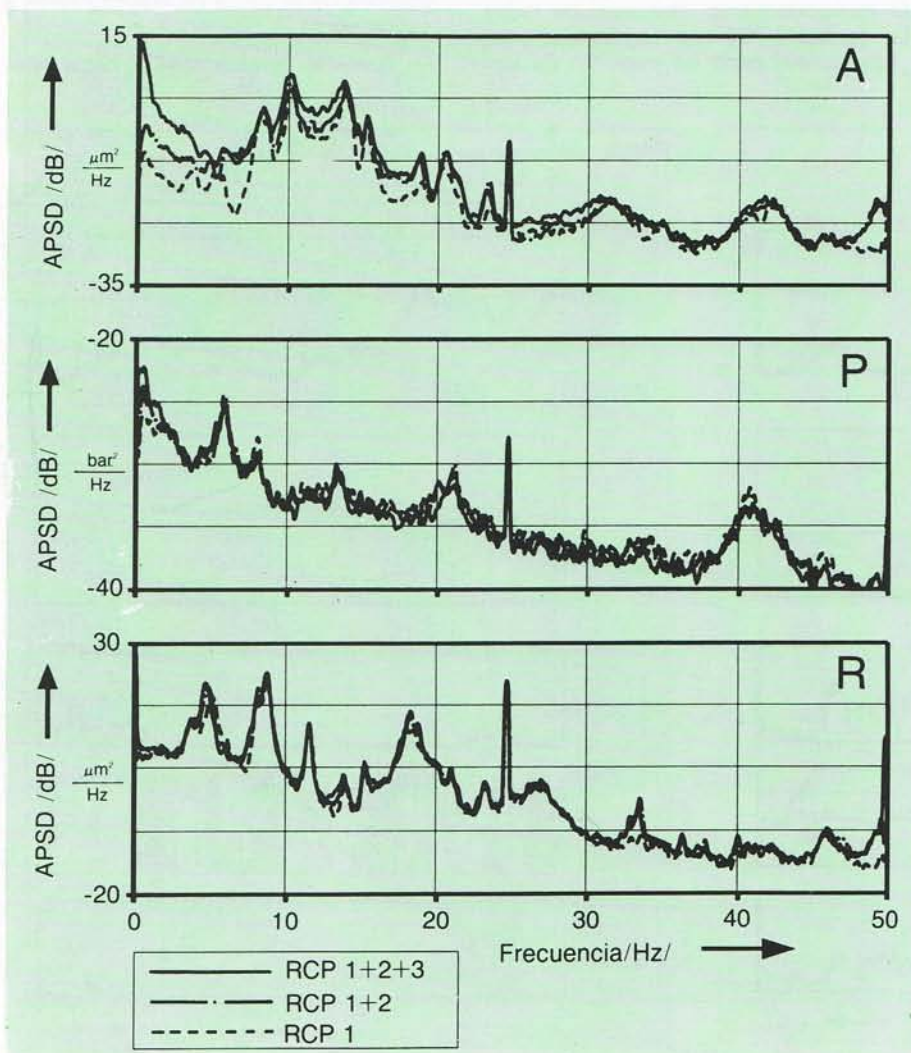
F III Armarios electrónicos del sistema de vibraciones





F IV Señales típicas en función del tiempo.

F V Espectros típicos A, R y P para 1, 2 y 3 bombas principales en operación.



ción de las señales en los dominios de tiempo y de frecuencia.

En la figura III se muestran los dos armarios con el equipo electrónico, con la unidad de acondicionamiento de señales a la izquierda, y a la derecha la unidad de evaluación, con el registrador, analizador espectral y plotter.

EVALUACION EN EL DOMINIO TEMPORAL

Amplitudes máximas.

Las señales se registran en función del tiempo y se determinan sus amplitudes máximas. Los resultados de C.N. Trillo I obtenidos se muestran en la Tabla I y en la figura IV.

DIAGRAMAS NOY

Se representan respecto a dos ejes verticales los desplazamientos horizontales de las bombas principales, tuberías del primario, así como los desplazamientos relativos Barrilete-Vasija.

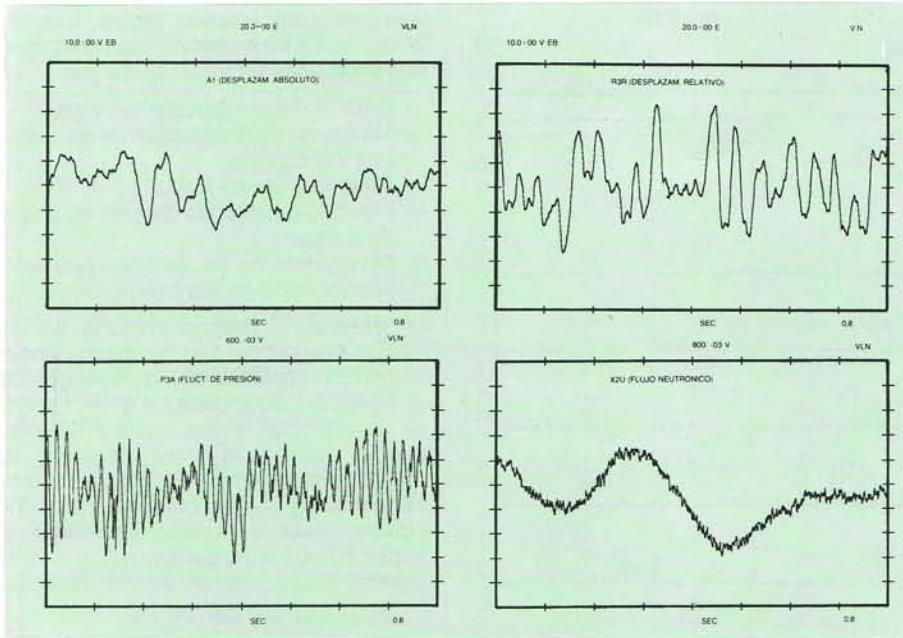
RESULTADOS EN FUNCION DE LA FRECUENCIA

Se determinan las densidades espectrales (PSD) de las señales medidas. Conjuntamente los resultados de las fases B, C y D sirven para describir el comportamiento dinámico del Sistema de Refrigeración del Reactor, desde el punto de vista de la supervisión de vibraciones del mismo. En la figura V se muestran unos espectros típico para desplazamientos verticales de la vasija (A), fluctuaciones de presión en los lazos (P) y movimiento relativo entre los lazos y la contención (R), medidos con una, dos y tres bombas principales en funcionamiento.

Estos espectros, muestran que el comportamiento vibratorio de la vasija y del lazo (con su bomba en operación), es con excepción de cambios poco significativos en amplitud, prácticamente independiente de si las otras bombas están en operación.

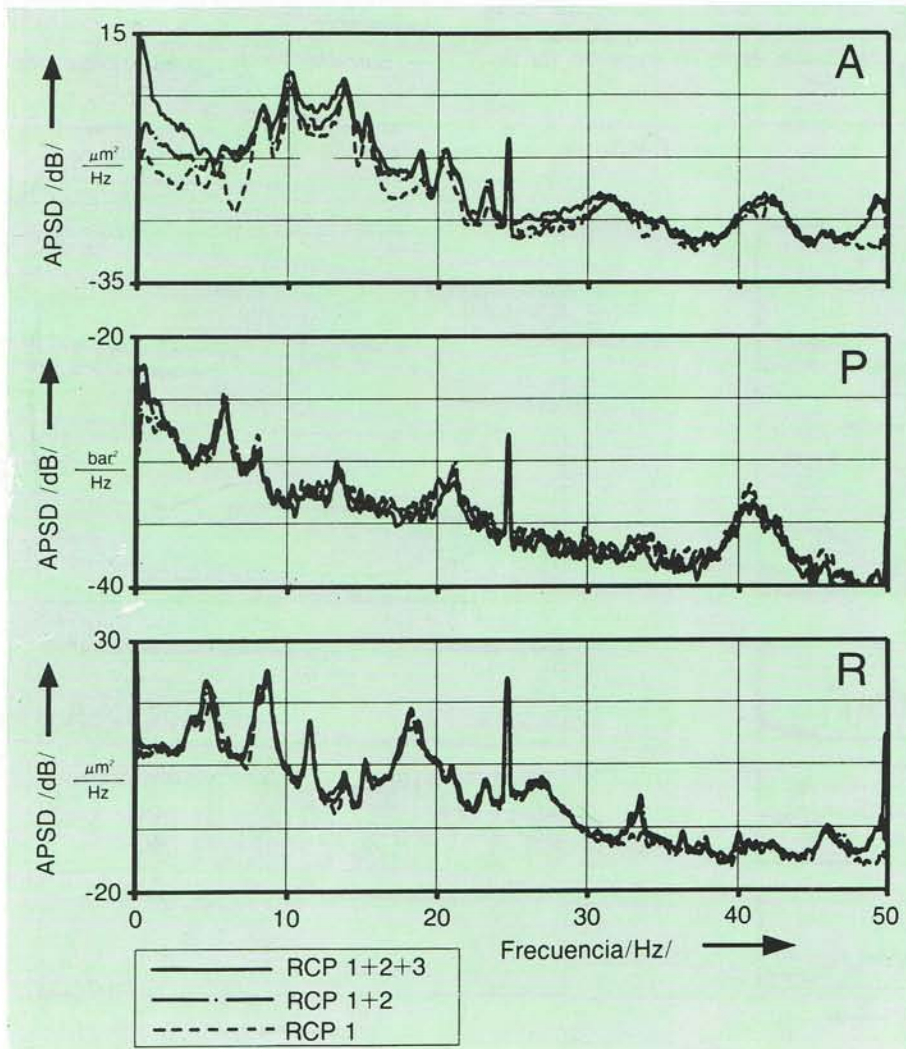
INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

Se puede detectar anticipadamente posibles daños en componentes del primario, si se observan cambios en los espectros de frecuencia asociados a cambios en el comportamiento dinámico de los componentes. Sin embargo, para una correcta interpretación de los espectros de densidad potencia PSD, es necesario tener un buen conocimiento de los modos y frecuencias propios de los componentes a vigilar y de las posibles influencias de los parámetros de proceso.



F IV Señales típicas en función del tiempo.

F V Espectros típicos A, R y P para 1, 2 y 3 bombas principales en operación.



ción de las señales en los dominios de tiempo y de frecuencia.

En la figura III se muestran los dos armarios con el equipo electrónico, con la unidad de acondicionamiento de señales a la izquierda, y a la derecha la unidad de evaluación, con el registrador, analizador espectral y plotter.

EVALUACION EN EL DOMINIO TEMPORAL

Amplitudes máximas.

Las señales se registran en función del tiempo y se determinan sus amplitudes máximas. Los resultados de C.N. Trillo I obtenidos se muestran en la Tabla I y en la figura IV.

DIAGRAMAS NOY

Se representan respecto a dos ejes verticales los desplazamientos horizontales de las bombas principales, tuberías del primario, así como los desplazamientos relativos Barrilete-Vasija.

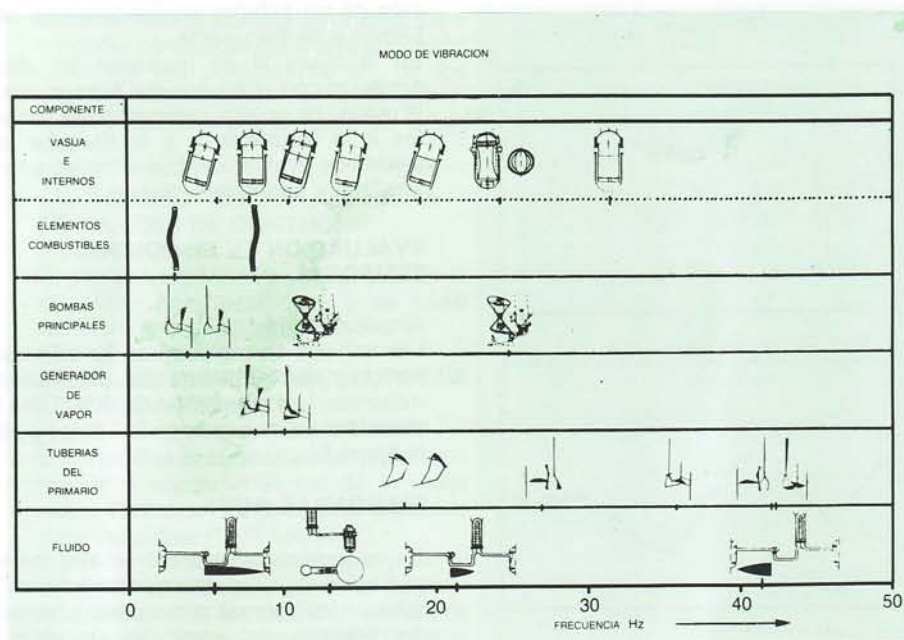
RESULTADOS EN FUNCION DE LA FRECUENCIA

Se determinan las densidades espectrales (PSD) de las señales medidas. Conjuntamente los resultados de las fases B, C y D sirven para describir el comportamiento dinámico del Sistema de Refrigeración del Reactor, desde el punto de vista de la supervisión de vibraciones del mismo. En la figura V se muestran unos espectros típico para desplazamientos verticales de la vasija (A), fluctuaciones de presión en los lazos (P) y movimiento relativo entre los lazos y la contención (R), medidos con una, dos y tres bombas principales en funcionamiento.

Estos espectros, muestran que el comportamiento vibratorio de la vasija y del lazo (con su bomba en operación), es con excepción de cambios poco significativos en amplitud, prácticamente independiente de si las otras bombas están en operación.

INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

Se puede detectar anticipadamente posibles daños en componentes del primario, si se observan cambios en los espectros de frecuencia asociados a cambios en el comportamiento dinámico de los componentes. Sin embargo, para una correcta interpretación de los espectros de densidad potencia PSD, es necesario tener un buen conocimiento de los modos y frecuencias propios de los componentes a vigilar y de las posibles influencias de los parámetros de proceso.



F VI Modos de vibración de los componentes del circuito primario.

IDENTIFICACION DE LAS FRECUENCIAS PROPIAS PRINCIPALES

El comportamiento dinámico de todas las centrales PWR es muy similar, pero cada central tiene un espectro de fre-

cuencias característico propio. Las vibraciones de los componentes principales son originadas principalmente por:

- Caudal del refrigerante principal.
- Masas no compensadas de las bombas principales.
- Resonancias de fluido.
- Fuerzas transitorias durante cambios de carga.
- Movimiento de los edificios respecto al soportado de los componentes.

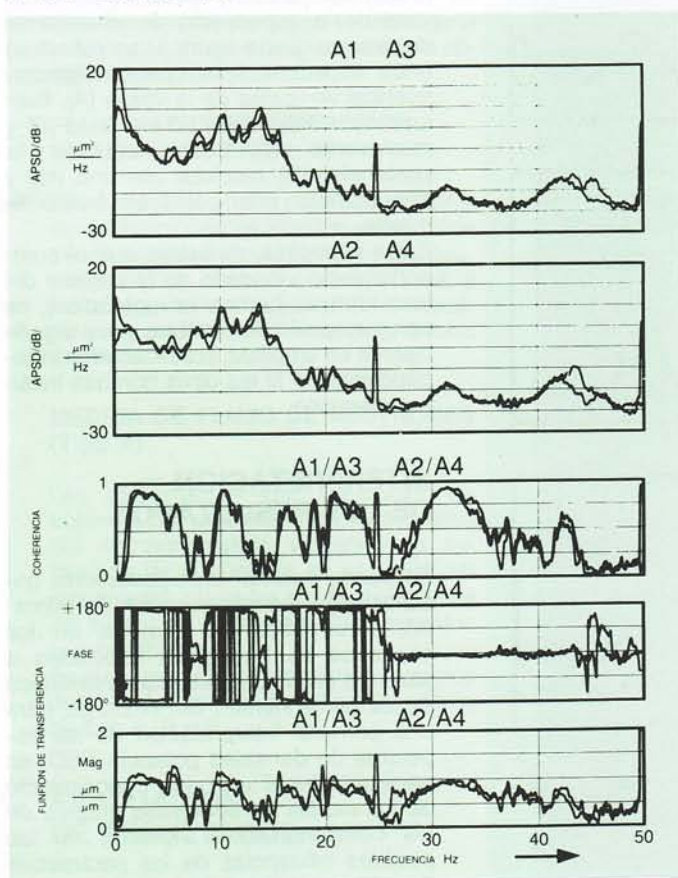
En general, el circuito primario de un PWR puede ser descrito como un sistema de masas acopladas con múltiples grados de libertad. Esto implica un gran número de resonancias. Puesto que el acoplamiento entre masas es pequeño, la mayor parte de los modos propios puede ser asociada con los componentes principales: vasija de presión, generador de vapor, bomba principal y tuberías. Con el sistema YG20 pueden ser identificadas:

- Resonancias estructurales.
- Resonancias de fluido.
- Vibraciones forzadas de componentes.

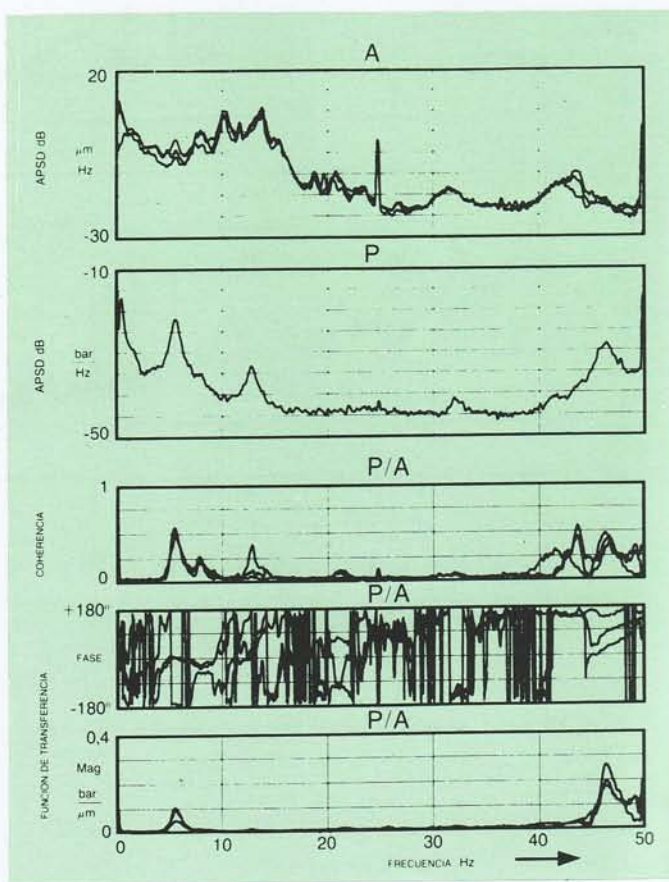
Los modos propios de vibración de los internos de la vasija de mayor interés a vigilar son:

- Barrilete: modos shell, modos aco-

F VIIa Correlación típica entre señales A/A.



F VIIb Correlación típica entre señales A/P.



Nº	Componente	Forma de resonancia	Señal	Función	Temper. de refer.	Frec. de refer.	Temp. actual	Frec. actual	Frec. normal	Desviac. actual	Desviac. de referen.
					°C	Hz	°C	Hz	Hz	Hz	Hz
1	EC	T.h	X1O	EDP	309	2.1-3.7		1.8-2.4	1.8-2.4	-0.3 -1.3	+0.3 -1.8
2	EC	T.h	X1U	EDP		2.3-3.7		1.8-2.5	1.8-2.4	-0.5 -1.2	
3	EC	T.h	X2O	EDP		2.5-3.9		1.8-2.8	1.8-2.8	-0.7 -1.1	
4	EC	T.h	X2U	EDP		2.5-3.8		1.8-2.8	1.8-2.8	-0.7 -1.0	
5	EC	T.h	X3O	EDP		2.6-3.9		1.5-2.3	1.5-2.3	-1.1 -1.6	
6	EC	T.h	X3U	EDP		2.8-3.8		1.8-2.3	1.8-2.3	-1.0 -1.5	
7	EC	T.h	X4O	EDP		2.1-3.8		1.8-2.3	1.8-2.3	-0.3 1.5	
8	EC	T.h	X4O	EDP		2.8-3.8		1.8-2.4	1.8-2.4	-1.0 1.4	
9	L1 BRR	R.v	R1D	EDP	292	3.9		3.8	3.8	-0.1	-0.4
10	L2 BRR	R.v	R2D	EDP	292	3.7		3.6	3.6	-0.1	
11	L3 BRR	R.v	R3D	EDP	293	3.9		4.8	4.8	-0.9	
12	L1 BRR	R.v	R1D	EDP	292	4.9		4.8	4.8	-0.1	-0.4
13	L2 BRR	R.v	R2R	EDP	292	5.1		4.9	4.9	-0.2	
14	L3 BRR	R.v	R3R	EDP	293	5.5		5.6	-0.1		
15	L1 Fluido	SW	P1E	EDP	310	5.6		5.5	5.5	-0.1	-0.3
16	L2 Fluido	SW	P2E	EDP	308	5.6		5.5	5.5	-0.1	
17	L3 Fluido	SW	P2A	EDP	308	5.6		5.6	5.6	0	
18	VPR - I	R.v	A1 A3	COH	309	5.7		5.6	5.6	-0.1	-0.5
19	VPR - I	R.v	A2 A4	COH	309	5.8		5.6	5.6	-0.2	
20	EC	T.h	X1O	EDP	309	6.9-9.1		—	—	—	-0.3 -1.0
21	EC	T.h	X1U	EDP		7.1-9.1		—	—	—	
22	EC	T.h	X2O	EDP		6.2-8.7		5.9	5.9	-0.3	
23	EC	T.h	X2U	EDP		6.3-8.2		5.6	5.6	-0.7	
24	EC	T.h	X3O	EDP		6.6-8.1		5.6	5.6	-1.0	
25	EC	T.h	X3U	EDP		6.5-8.7		5.6	5.6	-0.9	
26	EC	T.h	X4O	EDP		6.5-8.6		5.8	5.8	-0.7	
27	EC	T.h	X4U	EDP		6.8-9.4		5.9	5.9	-0.9	
28	VPR - I	T.v	A1 A4	COH	309	7.4-8.1		7.8	7.8	-0.4 -0.3	-0.5
29	L1 Fluido	SW	P1E	EDP	310	7.6		7.5	7.5	-0.1	-0.4
30	L2 Fluido	SW	P2E	EDP	308	—		—	—	—	
31	L3 Fluido	SW	P2A	EDP	308	—		7.4	7.4	—	
32	L1 GV,BRR	R.v	R1D	EDP	310	8.8		8.9	8.9	-0.1	-0.4
33	L2 GV,BRR	R.v	R2D	EDP	308	8.1		7.9	7.9	-0.2	
34	L3 GV,BRR	R.v	R3H	EDP	308	7.6		7.8	7.8	-0.2	
35	B,VPR	R.v	A1	EDP	309	10.3		9.9	9.9	-0.4	-0.5
36	B.V	R.v	A2	EDP	309	10.4		10.3	10.3		
37	L1 GV	T.v	R1V	EDP	310	10.4		10.4	10.4	0	-0.4
38	L2 GV	T.v	R2V	EDP	308	9.7		9.8	9.8	-0.1	
39	L3 GV	T.v	R3V	EDP	308	10.3		10.3	10.3	0	
40	L1 BRR	PV	R1R	EDP	292	11.8		11.6	11.6	-0.2	-0.3
41	L2 BRR	PV	R2R	EDP	292	11.8		11.8	11.8	0	
42	L3 BRR	PV	R3R	EDP	293	11.8		11.4	11.4	-0.4	
43	L1 Fluido	RC	P1E	EDP	327	12.9		13.0	13.0	-0.1	-0.4
44	L2 Fluido	RC	P1E	EDP	323	13.1		13.0	13.0	-0.1	
45	L3 Fluido	RC	P3A	EDP	323	12.9		12.9	12.9		
46	VPR - I	R.v T.v	A4	EDP	309	13.9		13.9	13.9	0	-0.5
47	VPR - I	R.v T.v	A3	EDP	309	14.0		14.4	14.4	-0.4	
48	L1 LI	T.h	R1R	EDP	292	18.1		18.6	18.6	-0.5	-0.5
49	L2 LI	T.h	R2R	EDP	292	17.7		17.9	17.9	-0.2	
50	L3 LI	T.h	R3R	EDP	293	18.1		17.9	17.9	-0.2	
51	L1 LI,BRR	T.h	R1R	EDP	292	18.8		19.0	19.0	-0.2	-0.5
52	L2 LI,BRR	T.h	R2R	EDP	292	18.9		19.3	19.3	-0.4	
53	L3 LI,BRR	T.h	R3R	EDP	293	18.8		19.0	19.0	-0.2	

F VIII Tabla de frecuencias de referencia

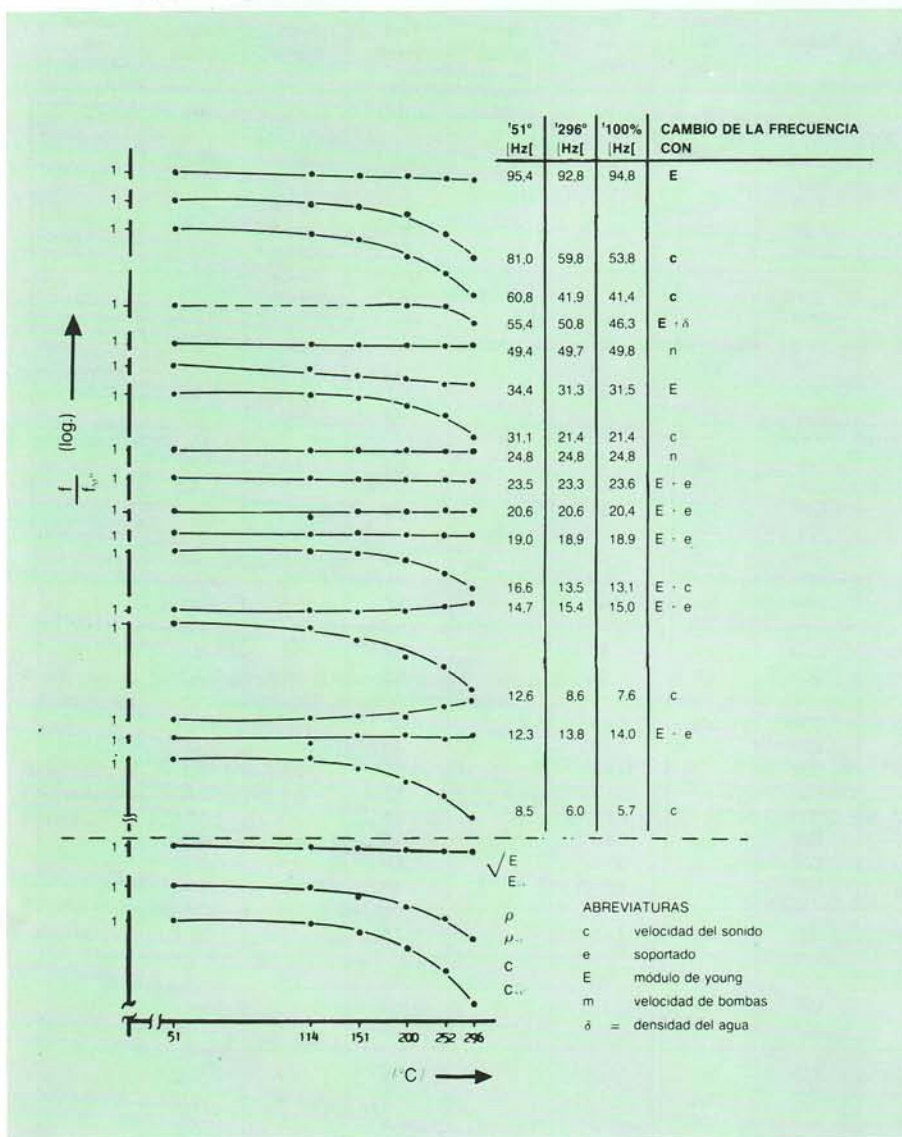


FIG IX Influencia de la temperatura en las frecuencias de resonancia.

TABLA I

Magnitud medida	Unidad	FASE B	FASE C	FASE D
Movimiento relativo VPR/barrilete	mm	±0,375	—	—
Alargamiento tubuladura de accionamiento de las barras de control	m/m	±10	—	—
Movimiento absoluto VPR ...	m	±30	±20	—
Movimiento relativo lazo/edificio	mm	±0,23	±0,15	±0,1
Fluctuación de presión lazo	bar	±0,8	±0,75	±0,8
Fluctuaciones flujo neutrones	mV	—	—	±20

plados pendulares, modos acoplados verticales.

- Primer modo de la estructura soporte superior del núcleo y de la corona distribuidora de flujo.
- Primeros modos de los elementos combustibles.

Todos estos modos de vibración pueden ser vigilados mediante el análisis espectral de las señales A, P y X.

De los espectros PSD de diferentes transductores se puede observar que muchos de los picos dominantes coinciden para distintos tipos de medida, siendo parte de la información de los espectros idéntica y parte complementaria, por lo que la información debe ser analizada de una forma integrada.

Es necesario también distinguir entre los picos de frecuencia debidos a vibraciones estructurales propias de los componentes, de aquéllos debidos a vibraciones forzadas por resonancia de fluido.

La correspondencia de los picos observados con las resonancias de las estructuras vigiladas, sólo puede ser establecida con la ayuda de información adicional obtenida de:

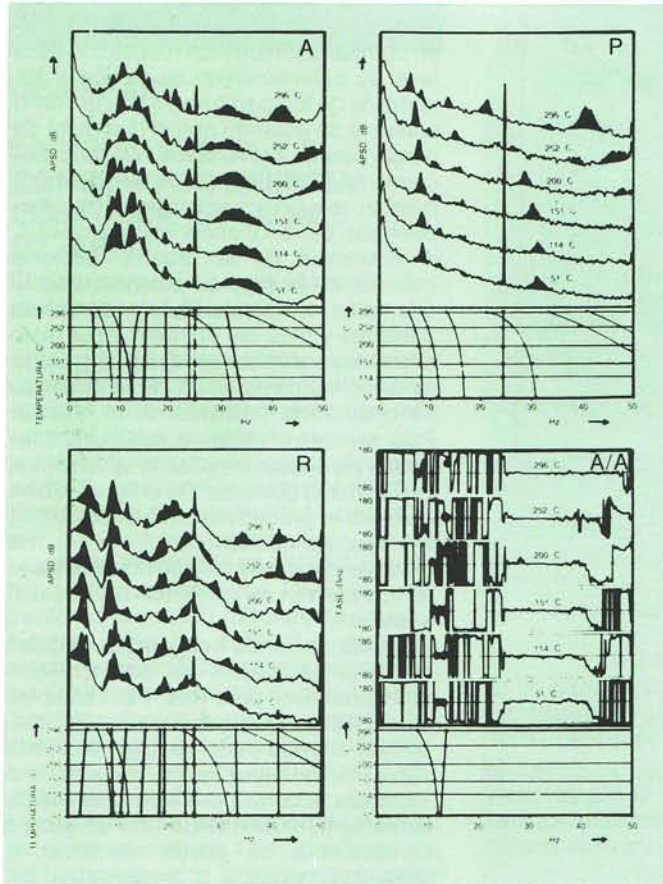
- Cálculos de análisis modal.
- Experimentos de análisis modal.
- Evaluación de las medidas de puesta en marcha con técnicas de correlación.

Las frecuencias de referencia de experimentos de análisis modal se basan en los resultados obtenidos por KWU para PWR, y los análisis modales fueron calculados para la vasija e internos de C.N. Trillo. Los principales modos se esquematizan en la figura VI.

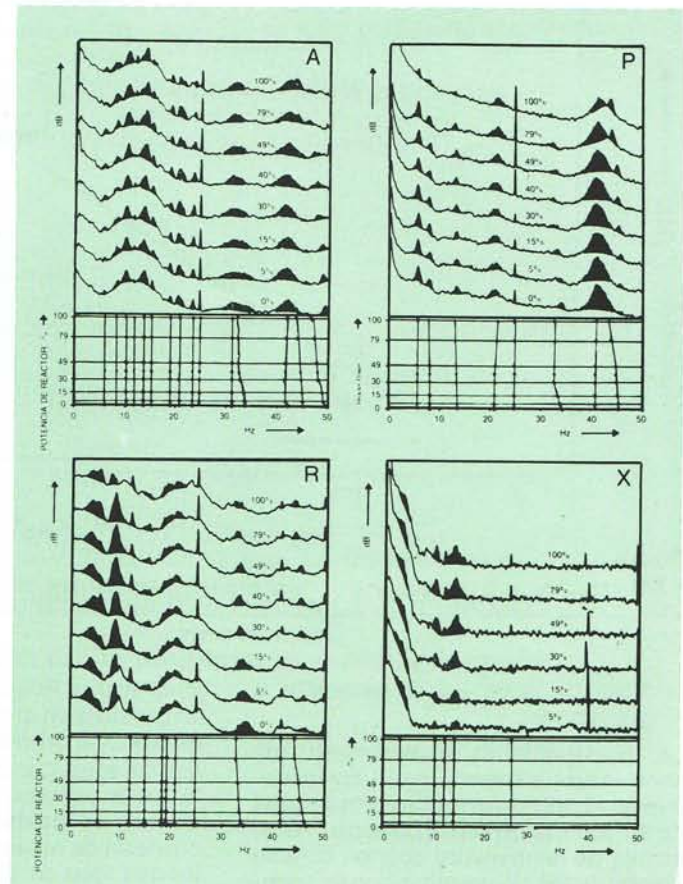
Como ejemplo de las técnicas de correlación, en la figura VII se muestra la correlación de las señales de transductores A opuestos simétricamente, y la correlación de señales de tipo A y P. En base a la primera de las correlaciones de la figura VIIa es posible diferenciar entre movimientos pendular y vertical de la vasija (cuando los transductores A puestos muestran alta coherencia, y la diferencia de fase es de 180° o de 0° en sus correlaciones). La segunda correlación entre A y P de la figura VIIb muestra qué vibraciones de la vasija son excitadas por resonancias del fluido.

El programa de vigilancia de vibraciones consiste en la supervisión de las frecuencias de acuerdo con una Lista de Comprobación. Esta lista determina:

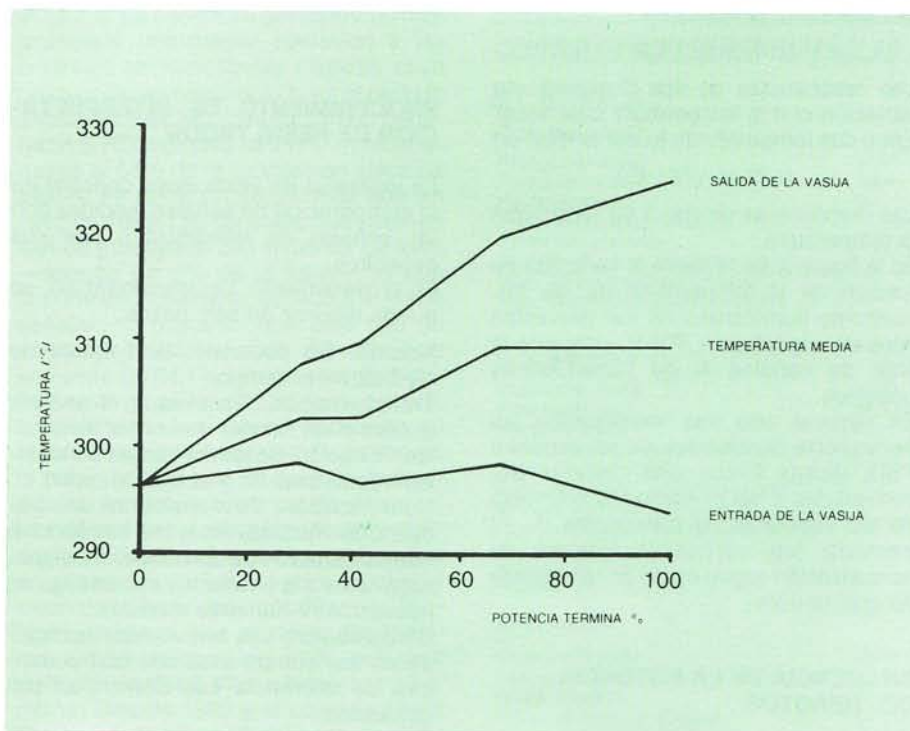
- Los componentes del primario que deben ser vigilados junto con los tipos de vibración.
- Las señales y funciones características con las cuales las frecuencias deben ser vigiladas.
- Las frecuencias y temperaturas de referencia.
- Las bandas de desviación de frecuencia de referencia.



FX Influencia de la temperatura en los espectros



FXI Influencia de la potencia del reactor en los espectros.



FXII Diagrama de carga parcial.

Los siguientes datos son incorporados en la lista cada vez que se realiza la medida de vibraciones de la inspección en servicio:

- Temperaturas de operación.
- Frecuencias medidas y frecuencias normalizadas a la medida de referencia, en los casos en que las condiciones de operación difieren de las condiciones de referencia.
- Las desviaciones de frecuencia detectadas.

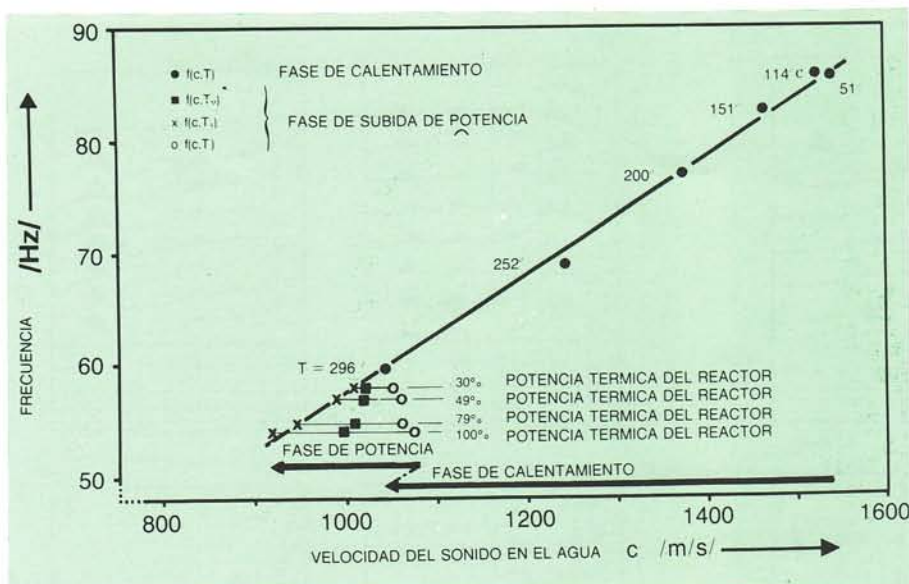
En Trillo se encuentran identificadas 90 frecuencias propias.

En la figura VIII se da un extracto de la lista de comprobación de las principales frecuencias de los espectros PSD identificadas en C.N. Trillo.

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y NORMALIZACION FRECUENCIAS

Los parámetros termohidráulicos que influyen en el comportamiento dinámico son:

- Temperatura del refrigerante.
- Presión del refrigerante.
- Caudal del refrigerante.
- Potencia del reactor.



F XIII Influencia de la velocidad acústica en las frecuencias de resonancia de fluido.

— Nivel de agua en el generador y presionador.

La temperatura es el parámetro que tiene mayor influencia en el comportamiento vibratorio, particularmente a causa de su correlación con la potencia. Variaciones de temperatura ocurren durante enfriamientos y calentamientos en conexión con cambios de carga.

Desde el punto de vista de vigilancia de vibraciones, la temperatura causa cambios de:

- Módulo de Young E.
- Densidad y velocidad del sonido en el agua c.
- Condiciones de soportado de componentes.

Cinco tipos de resonancia se pueden distinguir:

1. Resonancias de fluido que cambian con δ y c.
2. Frecuencia de resonancia de componentes que cambian con E.
3. Vibraciones de componentes originadas por las revoluciones de las bombas principales, y que son independientes de la temperatura.
4. Distribuciones de temperatura no estacionarias que dan información de la frecuencia propia de estructuras al modificarse las condiciones de soportado.
5. Combinación de los efectos de 2 y 4.

Cada uno de los anteriores tipos de resonancias muestra un comportamiento diferente respecto de la temperatura, ya que los parámetros (δ , c, E) tienen diferente dependencia de la temperatura. En la figura IX se muestran en la parte superior las frecuencias de resonancia normalizadas a las condiciones de estado frío como función de la temperatura. La

parte inferior muestra la influencia de la temperatura en el módulo de elasticidad del acero, la densidad y velocidad acústica del agua. Comparando las curvas de la parte superior con la de la parte inferior, es posible identificar las frecuencias de resonancia de cada uno de los tres tipos de vibración.

Las resonancias de tipo 1 decrecen con la temperatura más rápidamente que una relación proporcional. Entre dos temperaturas las frecuencias están relacionadas con la ecuación

$$f_1/f_2 = (C_1/C_2)^{0.8}$$

Las resonancias de tipo 2 tienen una variación con la temperatura casi lineal. Entre dos temperaturas existe la relación

$$f_1/f_2 = \sqrt{E_1/E_2}$$

Las resonancias de tipo 3 no varían con la temperatura.

En la figura X se muestra la variación en función de la temperatura de las frecuencias dominantes de los diferentes tipos de espectros A, P y R, junto con la fase de señales A de transductores opuestos.

En general, una vez identificadas las frecuencias dominantes de un espectro PSD, dichas frecuencias deberán ser convertidas a las condiciones normales de los espectros de referencias (T, P) mediante los adecuados factores de normalización según el tipo de resonancia de que se trate.

INFLUENCIA DE LA POTENCIA DEL REACTOR

La figura XI muestra los espectros de las señales A, P, R y X para diferentes niveles de la potencia del reactor. Los

niveles de la potencia del reactor. Los pequeños cambios de las frecuencias en comparación con los resultados de la fase de calentamiento se deben a los cambios de temperatura en función de la potencia de acuerdo con el diagrama de carga parcial de la figura XII. Las frecuencias de resonancia de fluido experimentan mayores cambios que las frecuencias de resonancia estructurales.

A diferencia de la prueba funcional caliente, en la fase de potencia existen diferentes temperaturas en las ramas calientes y frías del primario y por tanto diferentes velocidades acústicas. Comparando los cambios en las frecuencias de resonancia de fluido de la fase de calentamiento con las obtenidas a diferentes potencias, es posible localizar las resonancias de fluido. En la figura XIII se muestra el procedimiento básico:

Primero, las frecuencias de resonancia medidas durante la fase de calentamiento se representan en función de la velocidad acústica.

Posteriormente, las frecuencias medidas a diferentes niveles de potencia son representadas para las tres posibles velocidades acústicas para la temperatura de entrada (I) del reactor, de salida (O) y temperatura media (M). Si uno extrapola la curva para la fase de calentamiento para mostrar la fase de subida de potencia, se puede identificar la velocidad acústica o temperatura del reactor, la cual es responsable de la resonancia de fluido. Esta información es importante para determinar el modo de fluido.

PROCEDIMIENTO DE INTERPRETACION DE RESULTADOS

La vigilancia de vibraciones consiste en la comparación de señales medidas con las señales de referencia o con sus espectros.

El procedimiento de interpretación se puede resumir en seis pasos:

Medida: Se obtienen las señales de medida en el tiempo.

Transformación: Se efectúa el análisis espectral de Fourier de las señales.

Identificación: Se identifican las principales frecuencias f_m y el tipo de modo.

Normalización: Se transforman las frecuencias medidas f_m a las frecuencias normalizadas f_N de las condiciones operacionales a la cuales las frecuencias de referencia f_V han sido medidas.

Comparación: Las frecuencias normalizadas son comparadas con las frecuencias de referencia. Las diferencias son evaluadas.

Evaluación: Interpretación de las causas de la desviación de frecuencias, y comprobación si sobrepasa los límites aceptables. Decisión de las acciones a tomar.